



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑳ Aktenzeichen: P 34 35 748.3  
㉑ Anmeldetag: 28. 9. 84  
㉒ Offenlegungstag: 10. 4. 86

㉔ Anmelder:  
Siemens AG, 1000 Berlin und 8000 München, DE

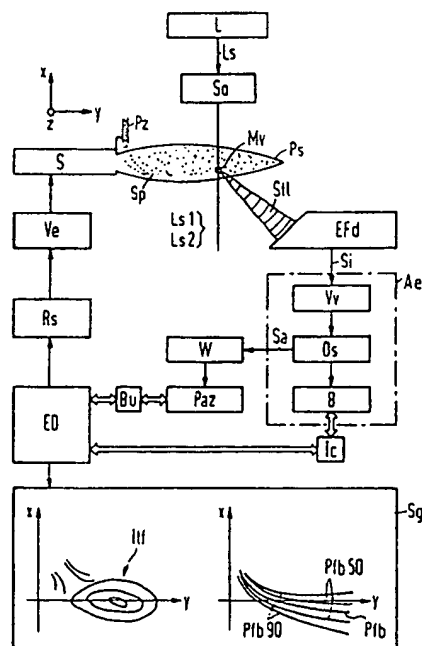
㉕ Erfinder:  
Mayr, Werner, Dr., 8028 Taufkirchen, DE

7.) DOS 34 35 748 AT 28. 9. 84  
Siemens AG

Diese Schrift behandelt die Messung der Geschwindigkeit und der Temperatur des Teilchen während des Fluges beim Plasmaspritzen. Nicht bezogen auf einen Beschichtungswerkstoff.

㉖ Verfahren und Einrichtung zum Beschichten von Werkstücken durch thermisches Spritzen, insbesondere durch Plasmaspritzen

Beim thermischen Spritzen sollen die Betriebsparameter auch ohne die wiederholte, kosten- und zeitintensive Untersuchung der Spritzschichten eingestellt werden können. Hierzu werden die Partikelgeschwindigkeiten und der Schmelzzustand der Spritzpartikel (Sp) am Ort der Beschichtung zumindest näherungsweise ermittelt und dann durch entsprechende Einstellung von Betriebsparametern optimiert. Mit dieser Einstellung wird dann die Beschichtung der Werkstücke durchgeführt. Zur Ermittlung der Partikelgeschwindigkeiten dient ein Laser-Anemometer, dessen Meßvolumen (Mv) relativ zum heißen Gasstrahl verstellbar ist. Die Partikelstromdichte wird durch einen Partikelzähler (Paz) ermittelt, welcher die Anzahl der jeweils durch das Meßvolumen (Mv) fliegenden Spritzpartikel (Sp) zählt. Die mittleren Partikelflugbahnen (Pfb) und der Schmelzzustand werden in einer Einrichtung zur digitalen Datenverarbeitung (ED) errechnet.



Patentansprüche

1. Verfahren zum Beschichten von Werkstücken durch thermisches Spritzen, insbesondere durch Plasmaspritzen, bei welchem Spritzpartikel von einem heißen Gasstrom beschleunigt und im geschmolzenen oder plastischen Zustand auf die zu beschichtenden Oberflächen der Werkstücke geschleudert werden, dadurch g e k e n n z e i c h n e t , daß im freien Gasstrom die Partikelgeschwindigkeiten ( $v$ ) und der Schmelzzustand der Spritzpartikel ( $Sp$ ) am dem vorgesehenen Ort der zu beschichtenden Werkstücke zumindest näherungsweise ermittelt und durch Einstellung von Betriebsparametern des thermischen Spritzens optimiert werden und daß dann mit den nunmehr eingestellten Betriebsparametern die Beschichtung der Werkstücke durchgeführt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch g e k e n n z e i c h n e t , daß zur Ermittlung der Partikelgeschwindigkeiten ( $v$ ) und des Schmelzzustandes der Spritzpartikel ( $Sp$ ) an dem vorgesehenen Ort der zu beschichtenden Werkstücke zunächst an einer Vielzahl von Meßorten im Bereich des heißen Gasstroms die Partikelgeschwindigkeiten ( $v$ ) und die Partikelstromdichten gemessen werden und daß dann die mittleren Partikelgeschwindigkeiten an den Meßorten, die mittleren Partikelflugbahnen ( $Pfb$ ) und die mittleren Verweilzeiten der Spritzpartikel ( $Sp$ ) im heißen Gasstrom errechnet werden.

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch g e k e n n z e i c h n e t , daß nur die horizontalen Geschwindigkeitskomponenten ( $v_y$ ) der Spritzpartikel ( $Sp$ ) gemessen werden.

4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, dadurch g e k e n n

z e i c h n e t , daß die Messungen auch zwischen der Beschichtung von zwei Werkstücken durchgeführt werden.

5. Einrichtung zum Beschichten von Werkstücken mit einer thermischen Spritzvorrichtung, insbesondere einer Plasmaspritzvorrichtung, welche von einem heißen Gasstrom beschleunigte Spritzpartikel im geschmolzenen oder plastischen Zustand auf die zu beschichtenden Oberflächen der Werkstücke schleudert, g e k e n n z e i c h n e t durch

- ein Laser-Anemometer zur Ermittlung der Geschwindigkeit (v) der durch ein Meßvolumen (Mv) fliegenden Spritzpartikel (Sp),
- einen Partikelzähler (Paz) zur Ermittlung der Anzahl der pro Zeiteinheit durch einen Querschnitt des Meßvolumens (Mv) fliegenden Spritzpartikel (Sp),
- eine Verstelleinrichtung (Ve), durch welche die Lage des Meßvolumens (Mv) relativ zum heißen Gasstrom verstellbar ist und
- eine Einrichtung zur digitalen Datenverarbeitung (ED), welcher zur Errechnung der mittleren Partikelflugbahnen (Pfb) der Spritzpartikel (Sp) das Ausgangssignal des Partikelzählers (Paz) zuführbar ist.

6. Einrichtung nach Anspruch 5, dadurch g e k e n n z e i c h n e t , daß das Laser-Anemometer als Laser-Doppler-Anemometer ausgebildet ist.

7. Einrichtung nach Anspruch 6, g e k e n n z e i c h n e t durch ein Laser-Doppler-Anemometer, bestehend aus

- einem Laser (L) zur Erzeugung eines Laserstrahls (Ls),
- einer Sendeoptik (So) zur Teilung des Laserstrahls (Ls) und zur Bildung des Meßvolumens (Mv) als Kreuzungsvolumen zweier fokussierter Laserstrahlen (Ls1, Ls2),

- einer Empfangsoptik zur Bündelung des Streulichts (Stl) von durch das Meßvolumen (Mv) fliegenden Spritzpartikeln (Sp) auf einen Fotodetektor und
- einer dem Fotodetektor nachgeschalteten Auswerteelektronik (Ae) zur Bildung eines der Geschwindigkeit der durch das Meßvolumen (Mv) fliegenden Spritzpartikel (Sp) entsprechenden Digitalsignals, welches der Einrichtung zur digitalen Datenverarbeitung (ED) zuführbar ist.

8. Einrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß in der Auswerteelektronik (Ae) diejenige Zeit meßbar ist, die ein durch das Meßvolumen (Mv) fliegendes Spritzpartikel (Sp) zum Überqueren einer vorgebbaren Anzahl von Interferenzstreifen (If) benötigt.

9. Einrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß in der Auswerteelektronik (Ae) eine Diskriminatorschaltung (Ds) vorgesehen ist, welche das Eingangssignal nur dann zu einem Streifenzähler (Sz) durchläßt, wenn dessen Momentanwert nacheinander und in richtiger Reihenfolge den Spannungswert Null, einen ersten vorgebbaren Spannungswert und einen zweiten vorgebbaren Spannungswert durchlaufen hat.

10. Einrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß dem Partikelzähler (Paz) ein Ausgangssignal (Sa) der Diskriminatorschaltung (Ds) zuführbar ist.

11. Einrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen dem Partikelzähler (Paz) und der Diskriminatorschaltung (Ds) ein ECL/TTL-Wandler (W) angeordnet ist.

12. Einrichtung nach Anspruch 10 oder 11, dadurch gekennzeichnet, daß der Partikelzähler (Paz) über einen Bus (Bu) ansteuerbar ist.

13. Einrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß der Einrichtung zur digitalen Datenverarbeitung (ED) ein Sichtgerät (Sg) zugeordnet ist, auf welchem die mittleren Partikelgeschwindigkeiten ortsrichtig grafisch darstellbar sind.

14. Einrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß der Einrichtung zur digitalen Datenverarbeitung (ED) ein Sichtgerät (Sg) zugeordnet ist, auf welchem die mittleren Partikelflugbahnen (Pfb) grafisch darstellbar sind.

Siemens Aktiengesellschaft  
Berlin und München

Unser Zeichen  
VPA 84 P 1818 DE

Verfahren und Einrichtung zum Beschichten von Werkstücken  
durch thermisches Spritzen, insbesondere durch Plasma-  
spritzen

---

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Beschichten von Werkstücken nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1 und eine Einrichtung zum Beschichten von Werkstücken nach dem Oberbegriff des Anspruchs 5.

Der Begriff "thermisches Spritzen" umfaßt mehrere Verfahren zum Beschichten von Werkstücken mit hochschmelzenden Stoffen, wie mit Metallen, Verbund- und Sonderwerkstoffen, aber auch mit niedrigschmelzenden Stoffen wie Kunststoffen. Mit den thermischen Spritzverfahren werden beispielsweise Schutzschichten gegen Verschleiß und Korrosion, elektrisch isolierende Schichten oder auch dünnwandige, freitragende Formteile hergestellt. Hierzu werden die Überzugsmaterialien von einem heißen Gasstrom beschleunigt und auf die zu beschichtenden Oberflächen der Werkstücke geschleudert. Die erwärmten Spritzpartikel sind gewöhnlich im geschmolzenem oder plastischem Zustand und kühlen beim Auftreffen auf die kälteren Oberflächen der Werkstücke rasch ab. Durch den Aufprall werden die Partikel flachgedrückt, sie verriegeln und überlagern einander, wobei sich ein dichter, zusammenhängender Überzug bildet. Zu den thermischen Spritzverfahren zählen das Flamspritzen, das Plasmaspritzen, das Detonations-spritzen und das Lichtbogenspritzen, wobei für den industriellen Einsatz insbesondere dem Plasmaspritzen eine besondere Bedeutung zukommt.

Die Qualität thermisch gespritzter Schichten wird durch die Einstellung einer Vielzahl von Betriebsparametern beeinflusst. Durch die starke Verkopplung der Parametereinflüsse ist es äußerst schwierig, eine optimale Einstellung der Betriebsparameter zu erreichen. Die Betriebsparameter werden dabei im Rahmen einer Versuchsreihe, ausgehend von einer Anfangseinstellung, modifiziert, worauf jeweils eine Beschichtung durchgeführt wird. Die Anfangseinstellung wird entweder intuitiv oder mittels bekannter Richtwerte durchgeführt. Die jeweils gespritzte Schicht wird untersucht, wobei diese Untersuchung das Anfertigen von Schliffen und Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop sowie Untersuchungen der Porosität und der Haftung der gespritzten Schichten einschließen. Ergibt eine Untersuchung eine unzureichende Schichtqualität, so muß ein weiterer Versuch mit modifizierten Betriebsparametern durchgeführt werden.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren und eine Einrichtung zum Beschichten von Werkstücken durch thermisches Spritzen zu schaffen, bei welchen eine Optimierung der Betriebsparameter auch ohne die wiederholte, kosten- und zeitintensive Untersuchung der Spritzschichten erfolgen kann.

Diese Aufgabe wird bei einem gattungsgemäßen Verfahren durch die kennzeichnenden Merkmale des Anspruchs 1 und bei einer gattungsgemäßen Einrichtung durch die kennzeichnenden Merkmale des Anspruchs 5 gelöst.

Der Erfindung liegt die Erkenntnis zugrunde, daß beim thermischen Spritzen die Schichtqualität durch den Zustand der Spritzpartikel vor deren Aufprall auf die zu beschichtenden Oberflächen bestimmt wird und daß dieser Zustand im wesentlichen durch die Geschwindigkeit und den Schmelzzu-

stand der Spritzpartikel definiert ist. Werden nun im freien Gasstrom die Partikelgeschwindigkeiten und der Schmelzzustand der Spritzpartikel an dem vorgesehenen Ort der zu beschichtenden Werkstücke zumindest näherungsweise ermittelt, so läßt sich der Zustand der Spritzpartikel an diesem Ort optimieren, ohne jeweils eine Beschichtung durchführen zu müssen. Erst mit den bezüglich des Zustands der Spritzpartikel optimierten Betriebsparametern wird dann die Beschichtung durch thermisches Spritzen durchgeführt. Die wiederholte kosten- und zeitintensive Untersuchung der Spritzschichten kann somit entfallen. Außerdem kann durch die Ermittlung der Partikelgeschwindigkeiten und des Schmelzzustandes der Spritzpartikel der Einfluß der Betriebsparameter in weiten Bereichen systematisch untersucht werden. Ein weiterer Vorteil ergibt sich dadurch, daß durch die Ermittlung und Optimierung des für die Schichtqualität maßgeblichen Zustandes der Spritzpartikel die Einführung neuer Spritzmaterialien und Spritzverfahren wesentlich erleichtert wird.

Die erfindungsgemäße Einrichtung umfaßt

- ein Laser-Anemometer zur Ermittlung der Geschwindigkeit der durch ein Meßvolumen fliegenden Spritzpartikel,
- einen Partikelzähler zur Ermittlung der Anzahl der pro Zeiteinheit durch einen Querschnitt des Meßvolumens fliegenden Spritzpartikel,
- eine Verstelleinrichtung, durch welche die Lage des Meßvolumens relativ zum heißen Gasstrom verstellbar ist und
- eine Einrichtung zur digitalen Datenverarbeitung, welcher zur Errechnung der mittleren Partikelflugbahnen der Spritzpartikel das Ausgangssignal des Partikelzählers zuführbar ist.

Das Laser-Anemometer, welches als Zweifokus-Laser-Anemometer oder als Laser-Doppler-Anemometer ausgebildet sein kann, er-



möglichst auch beispielsweise in einem Plasmastrahl die Messung der Geschwindigkeit der Spritzpartikel. Zusätzlich wird mit Hilfe des Partikelzählers die Stromdichte der Spritzpartikel an verschiedenen Meßorten ermittelt, so daß in der Einrichtung zur digitalen Datenverarbeitung aus diesen Werten die mittleren Partikelflugbahnen der Spritzpartikel errechnet werden können. Aus der Kenntnis der Geschwindigkeiten und der mittleren Partikelflugbahnen kann dann auf die mittlere Verweilzeit der Spritzpartikel im heißen Gasstrom geschlossen werden, wobei diese mittlere Verweilzeit ein Maß für den Wärmeübergang und damit für den Schmelzzustand der Spritzpartikel darstellt.

Entsprechend den vorstehenden Ausführungen ist bei einer bevorzugten Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens vorgesehen, daß zur Ermittlung der Partikelgeschwindigkeiten und des Schmelzzustandes der Spritzpartikel an dem vorgesehenen Ort der zu beschichtenden Werkstücke zunächst an einer Vielzahl von Meßorten im Bereich des heißen Gasstromes die Partikelgeschwindigkeiten und die Partikelstromdichten gemessen werden und daß dann die mittleren Partikelgeschwindigkeiten an den Meßorten, die mittleren Partikelflugbahnen und die mittleren Verweilzeiten der Spritzpartikel im heißen Gasstrom errechnet werden.

Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist vorgesehen, daß nur die horizontalen Geschwindigkeitskomponenten der Spritzpartikel gemessen werden. Diese vereinfachten und mit geringerem Aufwand durchzuführenden Messungen sind in vielen Fällen hinreichend genau, da die vertikalen Geschwindigkeitskomponenten deutlich kleiner sind als die horizontalen Geschwindigkeitskomponenten. Die vertikalen Geschwindigkeitskomponenten haben daher nur auf die Richtung der Partikelgeschwindig-

keiten einen Einfluß, während sie auf die Geschwindigkeitsbeträge nahezu keinen Einfluß haben.

Bei einer Variante des erfindungsgemäßen Verfahrens werden die Messungen auch zwischen der Beschichtung von zwei Werkstücken durchgeführt. Hierdurch wird dann eine routinemäßige Erfassung von Schwankungen während des Spritzbetriebes ermöglicht.

Bei einer bevorzugten Ausgestaltung der erfindungsgemäßen Einrichtung ist das Laser-Anemometer als Laser-Doppler-Anemometer ausgebildet. Dieses Laser-Doppler-Anemometer besteht dann vorzugsweise aus

- einem Laser zur Erzeugung eines Laserstrahls,
- einer Sendeoptik zur Teilung des Laserstrahls und zur Bildung des Meßvolumens als Kreuzungsvolumen zweier fokussierter Laserstrahlen,
- einer Empfangsoptik zur Bündelung des Streulichts von durch das Meßvolumen fliegenden Spritzpartikeln auf einen Fotodetektor und
- einer dem Fotodetektor nachgeschalteten Auswerteelektronik zur Bildung eines der Geschwindigkeit der durch das Meßvolumen fliegenden Spritzpartikel entsprechenden Digitalsignals, welches der Einrichtung zur digitalen Datenverarbeitung zuführbar ist.

Derartige nach der sog. Zweistrahl-Technik arbeitende Laser-Doppler-Anemometer haben insbesondere den Vorteil, daß die gemessenen Dopplerfrequenzen nicht vom Beobachtungsort abhängen.

Vorzugsweise ist in der Auswerteelektronik diejenige Zeit meßbar, die ein durch das Meßvolumen fliegendes Spritzpartikel zum Überqueren einer vorgebbaren Anzahl von Interferenzstreifen benötigt.

Der Streifenabstand kann dabei aus der Geometrie der Laser-

strahlen und aus der Wellenlänge des Laserlichts berechnet werden.

Weiterhin ist es vorteilhaft, wenn in der Auswerteelektronik eine Diskriminatorschaltung vorgesehen ist, welche das Eingangssignal nur dann zu einem Streifenzähler durchläßt, wenn dessen Momentanwert nacheinander und in richtiger Reihenfolge den Spannungswert Null, einen ersten vorgebbaren Spannungswert und einen zweiten vorgebbaren Spannungswert durchlaufen hat. Eine derartige Diskriminatorschaltung ermöglicht einen hohen Schutz gegen beispielsweise durch Rauschen verursachte Falschdaten. Ist dem Partikelzähler ein Ausgangssignal der Diskriminatorschaltung zuführbar, so können die Vorteile der Diskriminatorschaltung auch für die Ermittlung der Partikelstromdichten ausgenutzt werden. Dabei ist es zweckmäßig, wenn zwischen dem Partikelzähler und der Diskriminatorschaltung ein ECL/TTL-Wandler angeordnet ist und wenn der Partikelzähler über einen Bus ansteuerbar ist.

Gemäß einer besonders bevorzugten Ausgestaltung der erfindungsgemäßen Einrichtung ist der Einrichtung zur digitalen Datenverarbeitung ein Sichtgerät zugeordnet, auf welchem die mittleren Partikelgeschwindigkeiten ortsrichtig grafisch darstellbar sind. Auf diese Weise erhält man besonders rasch eine Information über die für die Schichtqualität maßgeblichen Endgeschwindigkeiten der Spritzpartikel an dem vorgesehenen Ort der zu beschichtenden Werkstücke.

Der Einrichtung zur digitalen Datenverarbeitung kann auch ein Sichtgerät zugeordnet sein, auf welchem die mittleren Partikelflugbahnen grafisch darstellbar sind. Es kann dann auf einen Blick erkannt werden, ob die mittleren Partikelflugbahnen einen im Hinblick auf die angestrebte Schicht-

qualität optimalen Verlauf aufweisen oder durch eine andere Einstellung entsprechender Betriebsparameter korrigiert werden müssen.

Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung ist in der Zeichnung dargestellt und wird im folgenden näher beschrieben.

Es zeigen:

Figur 1 ein Blockschaltbild einer Einrichtung zum Beschichten von Werkstücken mit einer Plasmaspritzvorrichtung,

Figur 2 die beiden sich kreuzenden und das Meßvolumen bildenden Laserstrahlen des Laser-Doppler-Anemometers der in Figur 1 dargestellten Einrichtung,

Figur 3 das Grundprinzip der Geschwindigkeitsmessung eines durch das Meßvolumen eines Laser-Doppler-Anemometers fliegenden Spritzpartikels,

Figur 4 ein stark vereinfachtes Blockschaltbild der Auswertelektronik der in Figur 1 dargestellten Einrichtung,

Figur 5 das Grundprinzip einer in der Auswertelektronik nach Figur 4 verwendeten Diskriminatorschaltung,

Figur 6 das Grundprinzip für die Erkennung des Burst-Endes eines Dopplersignals,

Figur 7 das Grundprinzip für die Ermittlung einer mittleren Partikelflugbahn aus den gemessenen Partikelstromdichten,

Figur 8 den optimalen Verlauf einer mittleren Partikelflugbahn im Plasmastrahl,

Figur 9 die grafische Darstellung mittlerer Partikelgeschwin-

digkeiten in Form eines Isotachenfeldes und

Figur 10 die in Form von Isothermen dargestellte Temperaturverteilung in einem Plasmastrahl.

Figur 1 zeigt in stark vereinfachter schematischer Darstellung eine Einrichtung zum Beschichten von Werkstücken mit einer Plasmaspritzvorrichtung, deren mit S bezeichnete Spritzpistole einen Plasmastrahl Ps erzeugt. Dabei wird das der nur schematisch dargestellten Spritzpistole S zugeführte Plasmagas durch einen zwischen zwei Elektroden erzeugten Gleichstromlichtbogen auf Plasmatemperatur erhitzt, wobei eine hohe Ausströmgeschwindigkeit des Plasmas an der Düse der Spritzpistole S bewirkt wird. Als Plasmagas kann beispielsweise ein Primärgas wie Argon oder Stickstoff und ein Sekundärgas wie Wasserstoff oder Helium verwendet werden. Das Überzugsmaterial wird vor der Düse der Spritzpistole S in Form von Pulver über ein Pulverzufuhrrohr Pz zugeführt. Für die Förderung des Pulvers wird dabei ein Trägergas verwendet, welches wie das Primärgas aus Argon oder Stickstoff bestehen kann. Bei der Beschichtung eines in Figur 2 nicht dargestellten Werkstückes werden die durch das Pulver gebildeten Spritzpartikel Sp durch den heißen Plasmastrahl Ps beschleunigt und im geschmolzenen oder plastischen Zustand auf die zu beschichtende Oberflächen geschleudert. Dabei hängt die Schichtqualität in erster Linie von der Partikelgeschwindigkeit und von dem Schmelzzustand der Spritzpartikel Sp am vorgesehenen Ort der Beschichtung ab. Bei Kenntnis dieser Partikelgeschwindigkeiten und des Schmelzzustandes der Spritzpartikel Sp könnte also die Schichtqualität durch eine entsprechende Einstellung von Betriebsparametern des Plasmaspritzens optimiert werden. Als maßgebliche Betriebsparameter sind dabei der Strom, die Spannung, der Primärgasfluß, der Sekundärgasfluß, der Pulverfluß und der Trägergasfluß zu nennen. Auch das Pulverzufuhrrohr Pz spielt

eine wesentliche Rolle, da es durch Auswechseln im Querschnitt verändert werden kann, die Richtung der Einblasung des Pulvers in den Plasmastrahl Ps bestimmt und auch durch seinen Abstand zum Plasmastrahl Ps die Schichtqualität beeinflusst.

Zur Messung der Partikelgeschwindigkeiten der im Plasmastrahl Ps beschleunigten Spritzpartikel Sp dient ein Laser-Doppler-Anemometer, welches aus einem Argon-Ionen-Laser L, einer Sendeoptik So, einer Empfangsoptik, einem als Fotomultiplier ausgebildeten Fotodetektor und einer Auswertelektronik Ae besteht. Die Empfangsoptik und der Fotodetektor sind dabei zusammengefaßt als ein Baustein Efd dargestellt. Insbesondere im Zusammenhang mit den Figuren 2 und 3 ist zu erkennen, daß die Sendeoptik So den von dem Argon-Ionen-Laser L erzeugten Laserstrahl Ls in zwei kohärente, fokussierte Laserstrahlen Ls1 und Ls2 aufteilt, die sich unter dem Winkel  $2\alpha$  schneiden und durch ihr Kreuzungsvolumen das innerhalb des Plasmastrahls Ps liegende Meßvolumen Mv bilden. Die beiden Laserstrahlen Ls1 und Ls2 sind dabei in bezug auf das in den Figuren 1 und 2 dargestellte x, y, z-Koordinatensystem in x-Richtung polarisiert. Als Folge der Überlagerung der beiden Laserstrahlen Ls1 und Ls2 ändert sich die Intensität im Meßvolumen Mv in der horizontalen y-Richtung periodisch, d.h. Orte maximaler und minimaler Helligkeit wechseln in y-Richtung ab. Dies ist in Figur 3 durch Interferenzstreifen If im Meßvolumen Mv aufgezeigt, wobei sich der Streifenabstand zu

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \alpha}$$

ergibt. Hierbei ist  $\lambda$  die Wellenlänge des Laserlichts. Bewegt sich ein Spritzpartikel Sp wie in Figur 3 gezeigt durch das Meßvolumen Mv, so wird es in Orten maximaler Helligkeit maximal Streulicht Stl und an Orten minimaler Helligkeit minimal Streulicht Stl aussenden. Die Modulationsfrequenz  $f_D$  des Streulichts Stl ist hierbei proportional zur

horizontalen Geschwindigkeitskomponente  $v_y$  der Partikelgeschwindigkeit  $v$ . Das Streulicht  $Stl$  wird im Baustein EFD von der Empfangsoptik auf den Fotodetektor gebündelt, welcher das Streulichtsignal in ein elektrisches Signal umwandelt.

Berücksichtigt man die gaußförmige Intensitätsverteilung der Laserstrahlen  $LS1$  und  $LS2$ , so ergibt sich ein typischer Signalverlauf, welcher auch als Burst bezeichnet wird. Ein derartiger Burst ist in Figur 3 dargestellt, wobei in horizontaler Richtung die Zeit  $t$  und in vertikaler Richtung das elektrische Signal  $Si$  aufgetragen ist. Aus jedem registrierten Burst läßt sich die horizontale Geschwindigkeitskomponente  $v_y$  des Spritzpartikels  $Sp$  berechnen zu

$$v_y = \frac{d}{T_D} = d \cdot f_D = \frac{\lambda \cdot f_D}{2 \sin \alpha}$$

Die Periodendauer  $T_D$  bzw. die Dopplerfrequenz  $f_D = 1/T_D$  wird aus dem gemessenen Signal entnommen.

Gemäß Figur 1 wird das von dem Fotodetektor erzeugte elektrische Signal  $Si$  der Auswerteelektronik  $Ae$  zugeführt, die meist auch als "LDA Counter Processor" bezeichnet wird. Das auch als Dopplersignal zu bezeichnende elektrische Signal  $Si$  durchläuft in der Auswerteelektronik  $Ae$  einen Vorverstärker  $Vv$ , eine Diskriminatorschaltung  $Ds$  und einen Baustein  $B$  für die digitale Messung der Dopplerfrequenz. Die gemessene Dopplerfrequenz wird dann als Maß für die Partikelgeschwindigkeit im Meßvolumen  $Mv$  über ein Interface  $Ic$  in eine Einrichtung zur digitalen Datenverarbeitung  $ED$  eingegeben, bei welcher es sich beispielsweise um einen Rechner handelt.

Von der Diskriminatorschaltung  $Ds$  wird ein Signal  $Sa$  abgezweigt und über einen ECL/TTL-Wandler  $W$  einem Partikel-

zähler Paz zugeführt, welcher die Anzahl der pro Zeiteinheit durch einen Querschnitt des Meßvolumens Mv strömenden Spritzpartikel Sp ermittelt. Die auf diese Weise durch den Partikelzähler Paz ermittelte Partikelstromdichte wird dann über einen Bus Bu in die Einrichtung zur digitalen Datenverarbeitung ED eingegeben.

Aus Figur 1 geht auch hervor, daß die Einrichtung zur digitalen Datenverarbeitung ED über eine Robotersteuerung Rs und eine Verstelleinrichtung Ve die Spritzpistole S in x-Richtung, in y-Richtung und in z-Richtung verstellen kann. Auf diese Weise kann der Plasmastrahl Ps relativ zum Meßvolumen Mv derart verstellt werden, daß an einer Vielzahl von vorgebbaren Meßorten innerhalb des Plasmastrahls Ps jeweils die Partikelgeschwindigkeiten und die Partikelstromdichten gemessen werden können. Diese Messungen werden beispielsweise an 100 ausgewählten Meßorten durchgeführt. Aus den an den verschiedenen Meßorten ermittelten und dann gespeicherten Partikelgeschwindigkeiten werden dann Mittelwerte gebildet und in einem Sichtgerät Sg ortsrichtig in Form eines Iso-tachenfeldes Itf grafisch dargestellt. Die Mittelwertbildung ist dabei erforderlich, weil die Spritzpartikel Sp aufgrund ihrer verschiedenen Größen an den gleichen Meßorten verschiedene Partikelgeschwindigkeiten aufweisen können. Außerdem wird aus den an den verschiedenen Meßorten ermittelten Partikelstromdichten eine mittlere Partikelflugbahn Pfb errechnet und im Sichtgerät Sg grafisch dargestellt. Die Linien Pfb 50 zeigen diejenigen Bereiche im Plasmastrahl Ps an, die von 50% aller Spritzpartikel Sp durchflogen werden, während die Linien Pfb 90 diejenigen Bereiche anzeigen, die von 90% aller Spritzpartikel Sp durchflogen werden.

In der Einrichtung zur digitalen Datenverarbeitung EDD können aus den mittleren Partikelgeschwindigkeiten und den



mittleren Partikelflugbahnen die mittleren Verweilzeiten der Spritzpartikel  $Sp$  im heißen Plasmastrahl  $Ps$  errechnet werden. Aus den mittleren Verweilzeiten kann dann aufgrund einer bekannten oder angenommenen Temperaturverteilung im Plasmastrahl  $Ps$  die Wärmeaufnahme der Spritzpartikel  $Sp$  und damit der Schmelzzustand der Spritzpartikel  $Sp$  bestimmt werden.

Mit Hilfe der in Figur 1 dargestellten Einrichtung können also an dem für die Beschichtung eines Werkstückes vorgesehenen Ort  $y = y_0$  die mittleren Endgeschwindigkeiten und der Schmelzzustand der Spritzpartikel  $Sp$  angegeben werden. Diese für die Schichtqualität maßgeblichen Werte können dann durch eine entsprechende Einstellung von Betriebsparametern optimiert werden. Erst mit den nunmehr eingestellten Betriebsparametern wird dann die Beschichtung der Werkstücke durchgeführt.

Bei der in Figur 1 dargestellten Auswerteelektronik  $Ae$  handelt es sich um ein Signalverarbeitungssystem, welches in "55L90a LDA Counter Processor", 1982, Seiten 1 bis 10, Prospekt der Firma DISA Elektronik A/S, DK-2740 Skovlunde, Dänemark näher beschrieben ist. Ein detailliertes Blockschaltbild der Auswerteelektronik Type 55L90a LDA Counter Processor ist dort auf Seite 5 dargestellt.

Figur 4 zeigt ein stark vereinfachtes Blockschaltbild der Signalverarbeitung. Der in dem Baustein  $EFd$  enthaltene Fotodetektor erzeugt als Dopplersignal ein elektrisches Signal  $Si$ , welches zunächst den Vorverstärker  $Vv$  mit stufenweise einstellbarer Verstärkung durchläuft. Der Vorverstärker  $Vv$  enthält außerdem stufenweise einstellbare Hochpaß- und Tiefpaß-Filter. Der Verlauf dieses derart vorverstärkten und gefilterten Dopplersignals ist in Figur 5 dargestellt. Die

nachfolgende Diskriminatorschaltung Ds, die auch als "Two Level Validation" bezeichnet wird, ist ein spezielles Amplitudenfilter. Nur dann, wenn der Momentanwert des Dopplersignals nacheinander und in richtiger Reihenfolge den Spannungswert Null, einen ersten Spannungswert von 50 mV und einen zweiten Spannungswert von 100 mV durchlaufen hat, wird das mittlerweile in eine Rechteckspannung (vgl. Fig. 5) umgeformte Dopplersignal an einen Streifenzähler Sz durchgelassen. Dieser Streifenzähler Sz steuert zwei Torschaltungen Ts1 und Ts2, die über eine Anzahl von beispielsweise 5/8 Nulldurchgängen bzw. vom Spritzpartikel Sp überquerten Interferenzstreifen If (vgl. Fig. 3) hinweg geöffnet bleiben. In der Öffnungsphase der beiden Torschaltungen Ts1 und Ts2 läuft in einen Niedrigstzähler Nz und einen Höchstzähler Hz die Zeitbasisfrequenz Zbf von beispielsweise 500 MHz ein.

Sobald die vor dem Höchstzähler Hz angeordnete Torschaltung Ts2 nach acht Nulldurchgängen geschlossen ist, wird in einem Komparator Kom in einer fest verdrahteten Rechenschaltung ein 5/8-Vergleich durchgeführt gemäß:

$$100 \cdot \left| \frac{5}{8} \cdot C_H - C_L \right| \leq e \cdot \frac{5}{8} \cdot C_H$$

Hierbei sind  $C_H$  und  $C_L$  die in dem Höchstzähler Hz bzw. dem Niedrigstzähler Nz anstehenden Werte und  $e$  ist die in Stufen vorgebbare Genauigkeitstoleranz des Komparators Kom. Nur die vom Komparator Kom als gültig bewerteten Counts werden zur weiteren Verarbeitung freigegeben und in das Interface Ic (vgl. Fig. 1) eingelesen. Damit ist sichergestellt, daß nur Dopplerfrequenzen und nicht etwa Rauschen gemessen werden.

In Figur 4 ist nochmals angedeutet, daß auch die Messung der Partikelstromdichte von dem handelsüblichen LDA Counter Processor abgeleitet werden kann. Hierzu wird ein Ausgangs-

signal Sa der Diskriminatorschaltung Ds über den ECL/TTL-Wandler W dem Partikelzähler Paz zugeführt, welcher über den Bus Bu (vgl. Fig. 1) ansteuerbar ist. Bei dem ECL/TTL-Wandler W handelt es sich um eine Transistorschaltung, welche eine emitter-gekoppelte Logik mit einer Transistor-Transistor-Logik verknüpft. Der Partikelzähler Paz registriert die Anzahl der in Figur 5 dargestellten Bursts und damit die Anzahl der pro Zeiteinheit durch einen bestimmten Querschnitt des jeweils angefahrenen Meßvolumens Mv fliegenden Spritzpartikel Sp (vgl. Fig. 3). Diese Werte werden dann für jedes mit Hilfe der Verstelleinrichtung Ve (vgl. Fig. 1) angefahrne Meßvolumen Mv gespeichert.

Figur 6 zeigt das Grundprinzip für die Erkennung des Burst-Endes eines Dopplersignals. Das Burst-Ende wird wieder über eine Diskriminatorschaltung bzw. "Two Level Validation" festgestellt, wenn nacheinander und in richtiger Reihenfolge die Triggerschwellen 100 mV, 50 mV und der Spannungswert Null durchlaufen werden. Durch diese Erkennung des Burst-Endes können in bestimmten Fällen, in welchen beispielsweise nacheinander drei kurze und zeitlich aufeinander abgestimmte Bursts auftreten, Falschdaten durch Abschalten des Counting-Prozesses vermieden werden. Außerdem wird die Erkennung des Burst-Endes für hier bevorzugt anzuwendende Betriebsarten des "LDA Counter Processors" verwendet, bei welchen zur Ermittlung der Partikelgeschwindigkeiten die jeweils insgesamt auftretende Anzahl von Interferenzstreifen If (vgl. Fig. 3) allein oder kombiniert mit dem vorstehend geschilderten 5/8-Vergleich gezählt wird.

Figur 7 zeigt in stark vereinfachter Darstellung das Grundprinzip für die Ermittlung der mittleren Partikelflugbahn Pfb aus den gemessenen Partikelstromdichten. In der x-, z-Ebene sind hier Linien konstanter Partikelstromdichte L20, L40, L60 und L90 angegeben, die

die äußeren Begrenzungen derjenigen Flächen angeben, durch welche in einer zur y-Richtung senkrechten Schnittebene 20% bzw. 40% bzw. 60% bzw. 90% aller der vom Partikelzähler Paz (vgl. Fig. 1 und 4) registrierten Spritzpartikel Sp fliegen. Die Linien L20 bis L90 sind in Figur 7 zur Vereinfachung der zeichnerischen Darstellung als zum Schnittpunkt der x-Achse und der z-Achse konzentrische Kreise angegeben, was aber tatsächlich wegen der im Plasmastrahl Ps (vgl. Fig. 1) vorhandenen Unsymmetrien nicht der Fall ist.

Die Schwerpunkte der durch die Linien L20 bis L90 begrenzten Flächen liegen wegen der im Plasmastrahl Ps vorhandenen Symmetrie in z-Richtung in der x, y-Ebene. Bei diesen Schwerpunkten handelt es sich nicht um die geometrischen Schwerpunkte der Flächen, sondern um die mit der Partikelstromdichte gewichteten Schwerpunkte. Bestimmt man nun für eine Vielzahl von Schnitten  $y = y_1$ ,  $y = y_2$ ,  $y = y_3$  usw. die Schwerpunkte derjenigen Flächen, durch welche die Mehrzahl aller Spritzpartikel Sp fliegt, so ergibt die Verbindungslinie dieser Schwerpunkte die mittlere Partikelflugbahn Pfb (vgl. Fig. 1). Für die Schwerpunktbildung werden dabei bevorzugt die Linien L90 herangezogen, da die verbleibenden 10% der Spritzpartikel Sp sich am Rande des Plasmastrahls Ps mit sehr niedrigen Geschwindigkeiten bewegen und auch nicht mehr aufgeschmolzen werden.

In Figur 8 zeigt die strichpunktiert dargestellte Linie eine ideale bzw. optimale mittlere Partikelflugbahn Pfb, die auf eine richtige Einstellung der hierfür maßgeblichen Betriebsparameter schließen läßt. Die gestrichelt und ausgezogen dargestellten Linien Pfb' bzw. Pfb'' zeigen auf falsche Parametereinstellungen beruhende Extremwerte der mittleren Partikelflugbahnen an. Bei der Linie Pfb' ist die Einblasung des Pulvers über das Pulverzufuhrrohr Pz so schwach, daß die Spritzpartikel Sp am Plasmastrahl Ps abprallen. Bei der Linie Pfb'' ist die Einblasung des Pulvers über das Pulverzufuhrrohr Pz zu stark, so daß die Spritzpartikel Sp durch

den Plasmastrahl Ps hindurchgeschossen werden.

Figur 9 zeigt in der x, y-Ebene das Isotachenfeld Itf der mittleren Partikelgeschwindigkeiten. Dabei entsprechen die Linien Li50, Li100, Li200, Li250 und Li300 mittleren Partikelgeschwindigkeiten von 50 bzw. 100 bzw. 200 bzw. 250 bzw. 300 m/s. An der zusätzlich eingezeichneten mittleren Partikelflugbahn Pfb ist zu erkennen, daß die Spritzpartikel Sp (vgl. Fig. 1, 3 und 8) zunächst beschleunigt und dann auf ihrem weiteren Weg in y-Richtung wieder abgebremst werden. Wichtig ist dabei insbesondere, daß die Spritzpartikel Sp in den heißen Zonen wegen der erforderlichen Wärmeaufnahme nicht zu schnell sind und daß am vorgesehenen Ort der Beschichtung die mittleren Endgeschwindigkeiten im Bereich der für eine optimale Schichtqualität erforderlichen Werte liegen.

Figur 10 zeigt schließlich als Beispiel die Temperaturverteilung im Plasmastrahl Ps in Form von in der x,y-Ebene liegenden Isothermen It1 bis It4. Dabei entspricht beispielsweise die Isotherme It1 einer Temperatur von  $5000^{\circ}\text{K}$ , während die Isotherme It4 einer Temperatur von beispielsweise  $20\,000^{\circ}\text{K}$  entspricht.

Mit der in Figur 1 schematisch dargestellten Einrichtung zum Beschichten von Werkstücken mit einer Plasmaspritzvorrichtung können für die Schichtqualität maßgebliche Erkenntnisse über die mittleren Endgeschwindigkeiten der Spritzpartikel und über den Schmelzzustand der Spritzpartikel gewonnen werden. Wird dabei festgestellt, daß die mittlere Endgeschwindigkeit zu hoch ist, so könnte dies zu einer Zerstörung empfindlicher Oberflächen der zu beschichtenden Werkstücke führen. In diesem Fall wird dann der Primär- und Senkundärgasfluß zurückgenommen und/oder die Stromstärke er-

niedrigt. Wird festgestellt, daß die mittlere Endgeschwindigkeit zu niedrig ist, so wird zunächst einmal geprüft, ob die mittlere Partikelflugbahn Pfb den in Figur 8 dargestellten optimalen Verlauf nimmt und ggf. eine Korrektur durchgeführt. Ist die mittlere Endgeschwindigkeit bei einem richtigen Verlauf der mittleren Partikelflugbahn Pfb zu niedrig, so wird der Primär- und Sekundärgasfluß erhöht und/oder die Stromstärke erhöht.

Wird bei der Überprüfung des Schmelzzustandes festgestellt, daß dieser zu niedrig ist, so wird zunächst einmal die mittlere Partikelflugbahn Pfb überprüft und ggf. eine Korrektur vorgenommen. Verläuft die mittlere Partikelflugbahn Pfb optimal, so wird die Stromstärke erhöht und/oder der Sekundärgasfluß erhöht. Ist der Schmelzzustand zu hoch, so können die Spritzpartikel Sp verdampfen oder sich zersetzen. In diesem Fall nimmt man dann die Stromstärke zurück und/oder man nimmt den Sekundärgasfluß zurück.

Sind nach der vorstehend geschilderten Überprüfung alle Betriebsparameter im Hinblick auf die Schichtqualität optimal eingestellt, so kann mit diesen Betriebsparametern dann die Beschichtung der Werkstücke durchgeführt werden.

Bei der als Ausführungsbeispiel der Erfindung geschilderten Einrichtung zum Beschichten von Werkstücken durch Plasmaspritzen basiert die Messung der Partikelgeschwindigkeiten allein auf der Messung der in Figur 3 dargestellten horizontalen Geschwindigkeitskomponente  $v_y$ . Es ist aber auch möglich, durch eine zusätzliche Messung der vertikalen Geschwindigkeitskomponente  $v_x$  (vgl. Fig. 3), die Partikelgeschwindigkeit  $v$  zu ermitteln. In diesem Fall kann dann ein Zweifarben-Laser-Doppler-Anemometer verwendet werden, welches die gleichzeitige Messung der horizontalen Geschwindigkeitskomponente  $v_y$  und der vertikalen Geschwin-

digkeitskomponente  $v_x$  ermöglicht. Hierzu wird beispielsweise ein grünes ( $\lambda = 514 \text{ nm}$ ) und ein blaues ( $\lambda = 488 \text{ nm}$ ) Interferenzstreifensystem erzeugt, in dem zwei grüne Laserstrahlen aus einer horizontalen Ebene und zwei blaue Laserstrahlen aus einer vertikalen Ebene in das gemeinsame Meßvolumen  $M_v$  (vgl. Fig. 3) fokussiert werden. Aus der Modulationsfrequenz des grünen Streulichtes kann die horizontale Geschwindigkeitskomponente  $v_y$  und aus der des blauen die vertikale Geschwindigkeitskomponente  $v_x$  der Partikelgeschwindigkeit  $v$  ermittelt werden.

Gemäß einer weiteren Variante der erfindungsgemäßen Einrichtung ist die in Figur 1 dargestellte Sendeoptik  $S_o$  mit zwei Braggzellen ausgerüstet, durch welche eine Frequenzverschiebung des Dopplersignals um 2 MHz bewirkt wird. Hierdurch kann der in der Praxis ggf. auftretende Bereich der Partikelgeschwindigkeiten  $v$  ausgewertet werden, ohne die Hoch- und Tiefpaßfilter im Vorverstärker  $V_v$  (vgl. Figuren 1 und 4) verstellen zu müssen. Eine derartige Verstellung der Hoch- und Tiefpaßfilter wäre ohne die Braggzellen insbesondere dann erforderlich, wenn die Partikelgeschwindigkeit  $v$  innerhalb des Plasmastrahls starken Schwankungen unterliegt.

14 Patentansprüche

10 Figuren

FIG 1

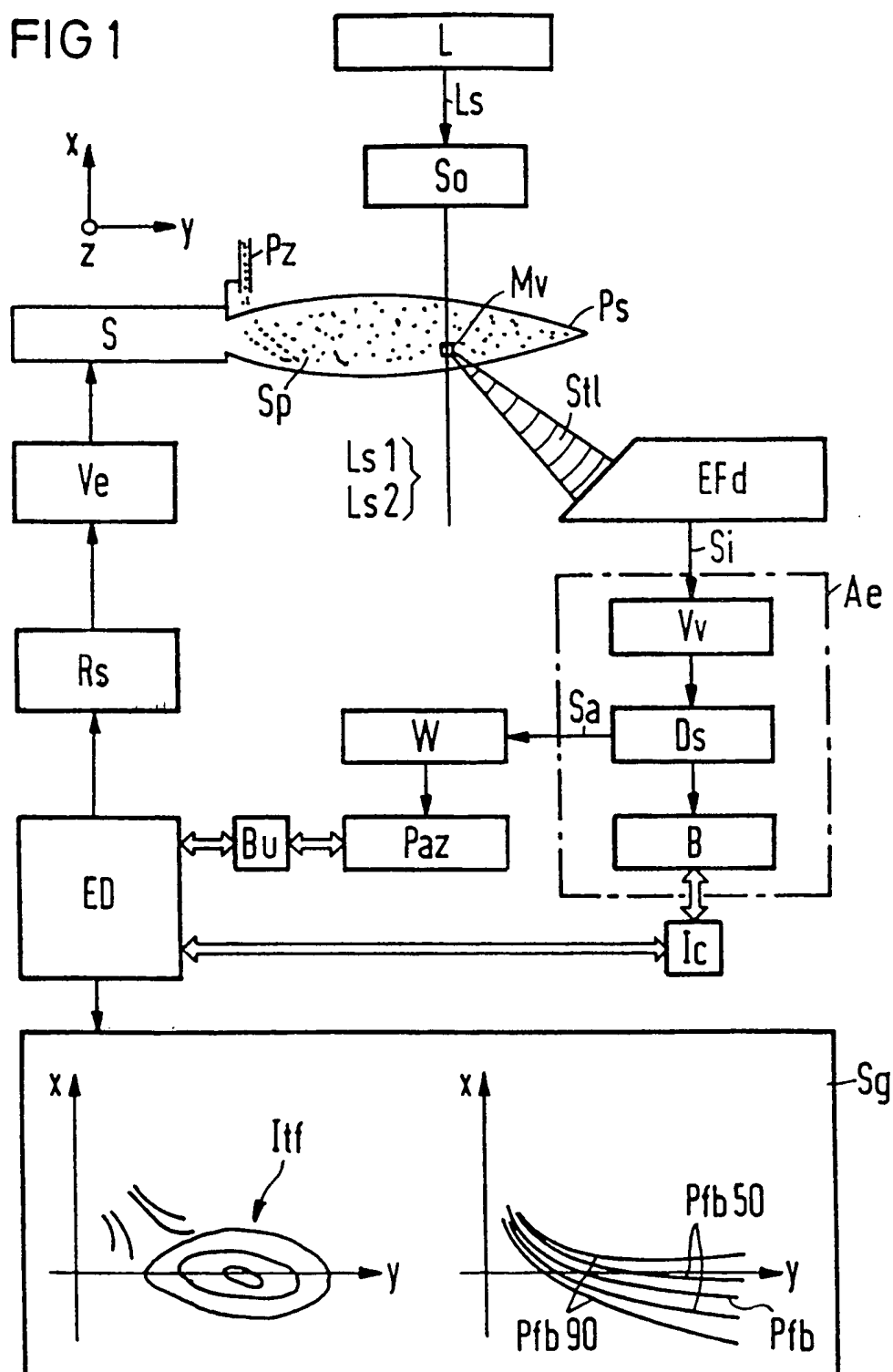




FIG 2

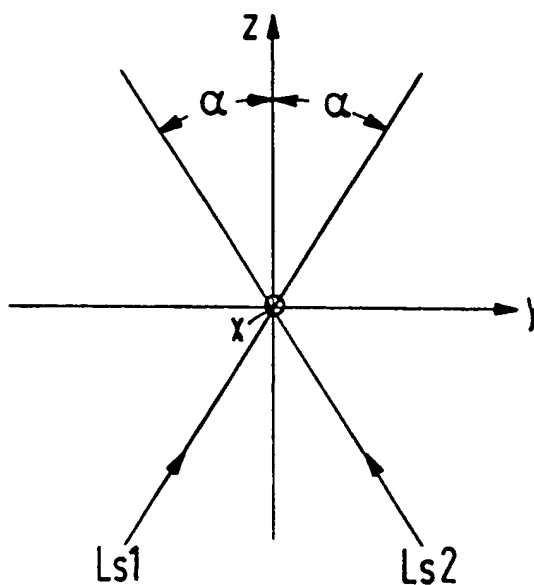


FIG 3

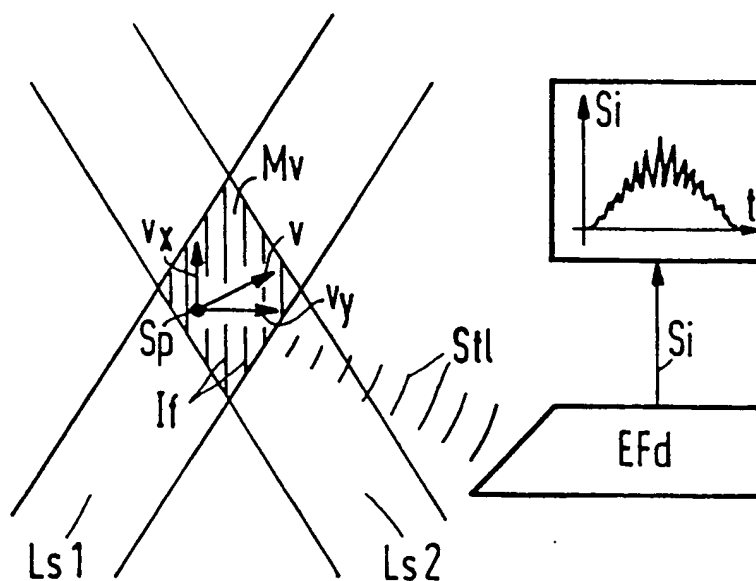


FIG 4

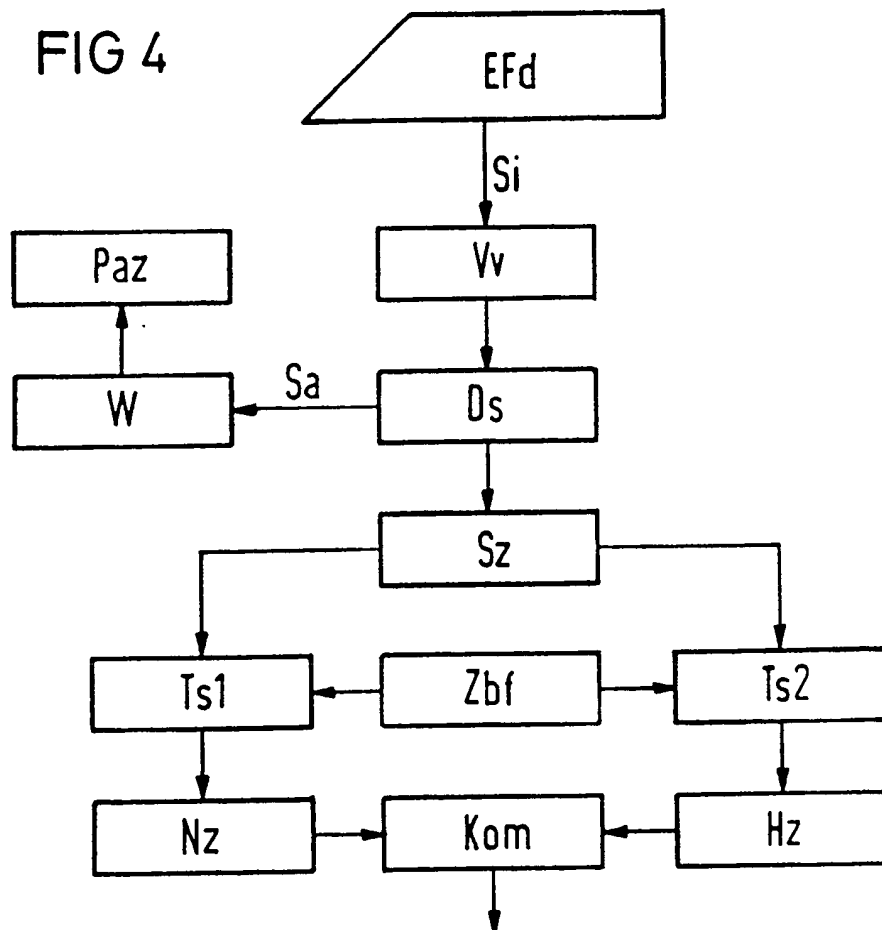


FIG 5

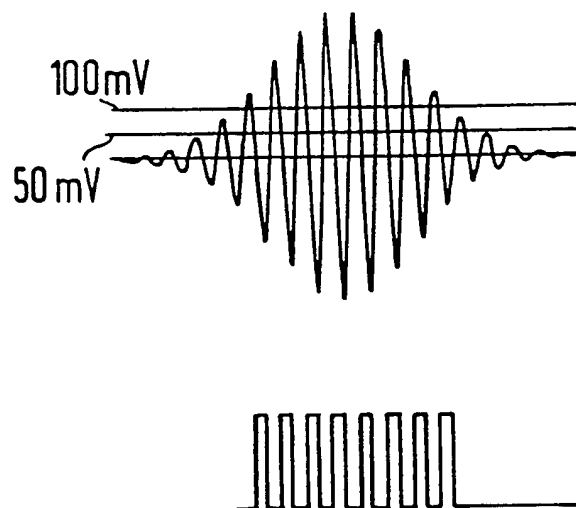


FIG 6

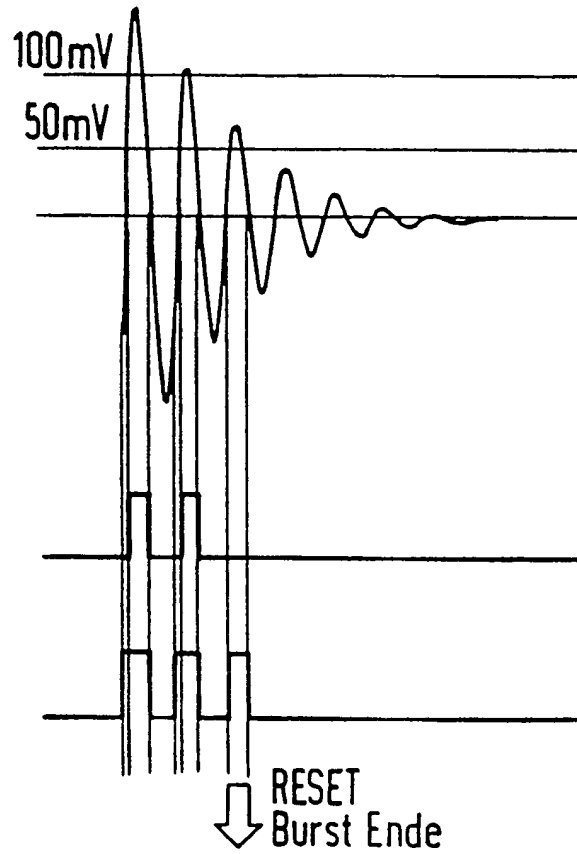


FIG 7

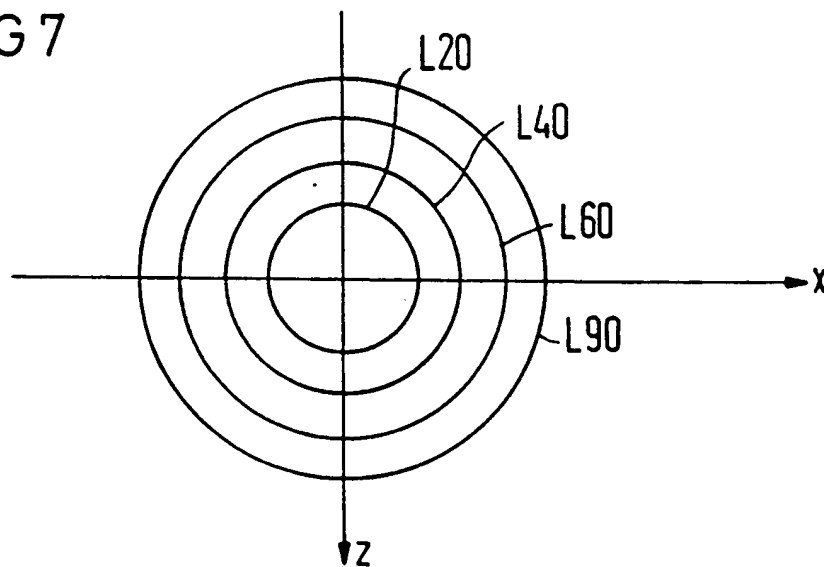


FIG 8

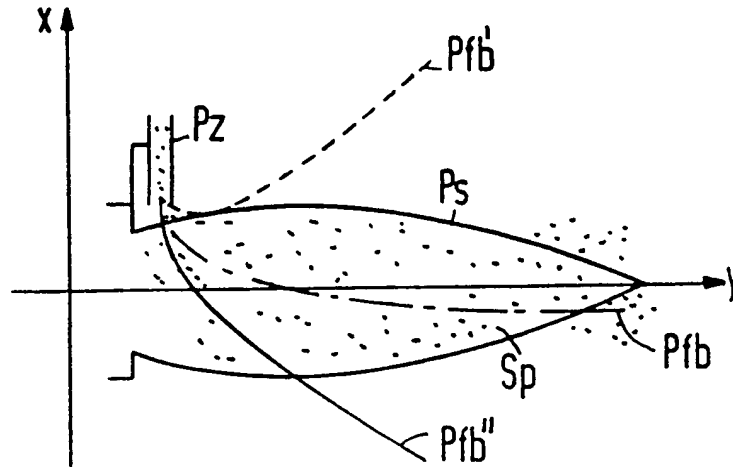


FIG 9

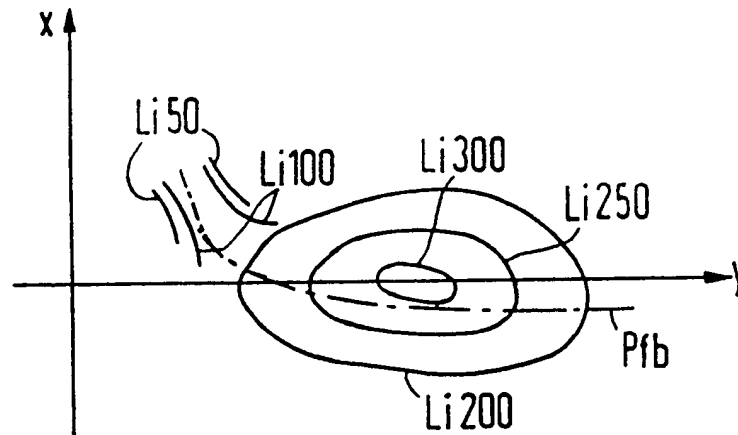


FIG 10

